

熱伝導と放射冷却を含めた銀河団プラズマのMHD 数値実験

浅井 直樹（千葉大自然）、福田 尚也（岡山理大）、松元 亮治（千葉大理）

ABSTRACT

近年の X 線観測により、銀河団中心部の温度は周囲に比べて 2 分の 1 から 3 分の 1 程度に下げ止まっていることがわかってきている。その温度分布を説明するためには、放射冷却と熱伝導を含めた計算が必要である。低密度プラズマでは熱伝導率は等方ではなく磁力線方向に伝わりやすくなる。そこで、放射冷却と非等方熱伝導を含めた 2 次元 MHD シミュレーションにより銀河団コアの熱的安定性を調べた。初期に乱流磁場を与えたシミュレーションの結果、銀河団コアへの熱供給が、熱伝導の非等方性を考慮しない場合に比べて抑制され、高温領域と低温領域が共存できること、銀河団コアは 1 Gyr 以上の間保たれることがわかった。

1. Introduction

近年の X 線観測により、銀河団中心部の構造が明らかになり、多くの銀河団において、その中心部の温度は周囲に比べ、 $1/2 \sim 1/3$ 程度に下げ止まっていることがわかった。この銀河団プラズマの温度分布を説明するためには、放射冷却とバランスする中心部へのエネルギー輸送や加熱が必要と考えられており、AGN ジェットや周囲からの熱伝導による加熱などがその候補と考えられている。熱伝導の振る舞いは磁場存在下では磁力線方向に依存するため、磁場を考慮した多次元シミュレーションが必要である。そこで我々は銀河団プラズマの熱的安定性を調べるため、放射冷却と熱伝導を含めた 2 次元 MHD シミュレーションを行なった。

2. Simulation model

我々は放射冷却と熱伝導を含む 2 次元散逸性 MHD コードを用いてシミュレートした。座標系はカーテシアン座標とし、長さ、速度、密度、時間のユニットは、 $r_0 = 15 \text{ kpc}$ 、 $v_0 = 790 \text{ km s}^{-1}$ 、 $\rho_0 = 5 \times 10^{-27} \text{ g cm}^{-3}$ 、 $t_0 = r_0/v_0 = 2 \times 10^7 \text{ yr}$ とした。計算領域は、 $900 \text{ kpc} \times 900 \text{ kpc}$ 、メッシュ数は、 1024×1024 である。熱伝導は、磁力線方向にのみ伝わる非等方熱伝導を用いている。放射冷却は熱制動放射を仮定する。電気抵抗モデルには、太陽フレアの計算で採用されている異常抵抗モデルを用いる。

乱流磁場中での銀河団プラズマの熱的安定性を調べるため、まず、銀河団の重力ポテンシャル中を運動する磁気圏を持つサブクランプをシミュレートし、銀河団全体に弱い磁場を形成する。このとき熱伝導と放射冷却は無視する。乱流磁場形成後を初期状態として熱伝導と放射冷却を含めてシミュレートする。計算モデルは、熱伝導と放射冷却を含めた model MI、放射冷却のみを含めた model MII、熱伝導のみを含めた MIII、両者を含めて磁場のない model H の 4 つである。

3. Simulation results

Fig. 1 は、 $t = 0.4 \text{ Gyr}$ での model MI (上図) と model MII (下図) の温度分布を示す。それぞれ、サブクランプの運動に励起された乱流磁場を持つ。Model MII では、放射冷却の効果により高密度の銀河団コアの温度は下がる。一方、Model MII では、熱伝導の効果により初期の温度勾配は均される。Fig. 2 は、model MI、MII、MIII、H の最低温度（コアの温度）の時間発展を示す。Model MII では急速に温度が下がるのに対して、model MI では熱伝導の効果により銀河団コアは加熱され、1 Gyr 以上保たれる。Model MIII では放射冷却の効果を無視しているので、コアは加熱され、その後ほぼ一様に保たれる。磁場を考慮しない Model H では等方的熱伝導の効果

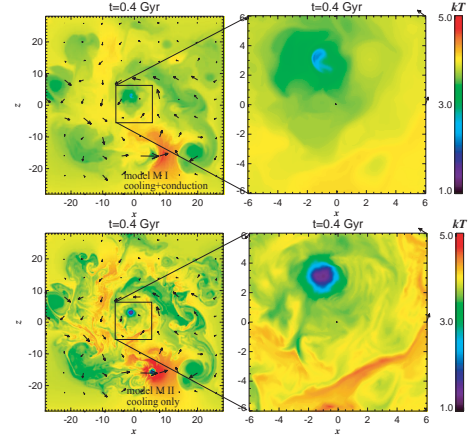


Fig. 1 Model MI (上図) と model MII (下図) の $t = 0.4 \text{ Gyr}$ での温度分布。左図は全計算領域、右図はその中心部 ($180 \text{ kpc} \times 180 \text{ kpc}$) を示す。

により、磁場があるモデルよりも急速に温度勾配が均される。このモデルでは計算領域の温度分布はほぼ一様となり、低温と高温プラズマは共存できない。

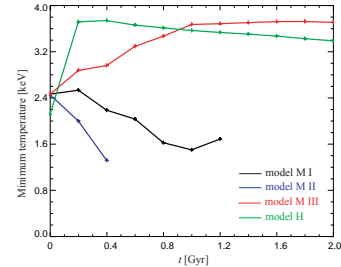


Fig. 2 銀河団コアの温度の時間発展。黒線、青線、赤線、緑線はそれぞれ、model MI、MII、MIII、H の結果を示す。

4. Summary and discussion

我々は乱流磁場存在下において ICM から熱伝導がどのように中心部の放射冷却とバランスするかを調べた。Fig. 1 と Fig. 2 で示したように、model MI では熱伝導の効果により銀河団コアの温度は、1 Gyr 以上保たれる。また、磁場による熱伝導抑制により低温と高温領域が存在する。ここで銀河団コアの冷却の抑制に対して磁場の効果を考察する。銀河団コアが冷却により収縮することにより中心部での磁気圧が強まるはずである。そのとき、磁気圧によりコアの収縮が抑制されたり、乱流磁場の収縮は磁気リコネクションを起こしコアが加熱されたりする可能性がある。